

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

ZAVRŠNI RAD

Filip Žanetić

Zagreb, 2017./2018.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

ZAVRŠNI RAD

Mentori:

Prof. dr. sc. Zdravko Schauperl

Student:

Filip Žanetić

Zagreb, 2018.

Izjavljujem da sam ovaj rad izradio samostalno koristeći znanja stečena tijekom studija i navedenu literaturu.

Zahvaljujem se mentoru prof. Zdravku Schauperlu i asistentu mag. ing. meh. Ivanu Juriću na pomoći pri pisanju rada.

Filip Žanetić



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE



Središnje povjerenstvo za završne i diplomske ispite
 Povjerenstvo za završne ispite studija strojarstva za smjerove:
 proizvodno inženjerstvo, računalno inženjerstvo, industrijsko inženjerstvo i menadžment, inženjerstvo
 materijala i mehatronika i robotika

Sveučilište u Zagrebu Fakultet strojarstva i brodogradnje	
Datum	Prilog
Klasa:	
Ur.broj:	

ZAVRŠNI ZADATAK

Student: **Filip Žanetić** Mat. br.:0035198242

Naslov rada na hrvatskom jeziku: **Fraktografska analiza cijevi od 25CrMo4 čelika**

Naslov rada na engleskom jeziku: **Fractography of 25CrMo4 tube**

Opis zadatka:

Dijelovi osobnih vozila koji su izrazito opterećeni tijekom eksploatacije izrađuju se od visokočvrstih čelika. To je pogotovo izraženo kod sportskih vozila ili vozila namijenjena visokim opterećenjima gdje su dijelovi šasije često izrađeni od 25CrMo4 čelika.

U radu je potrebno opisati zahtjeve koji se postavljaju na materijal za izradu šasija motornih vozila. U eksperimentalnom dijelu potrebno je napraviti fraktografsku analizu pukotine na cijevi od 25CrMo4 čelika nastale tijekom prometne nesreće. Potrebno je koristiti suvremene metode karakterizacije materijala koje uključuju svjetlosnu mikroskopiju, elektronsku mikroskopiju te određivanje osnovnih mehaničkih svojstava materijala. Na temelju dobivenih rezultata potrebno je donijeti zaključke o analiziranom materijalu te mogućim uzrocima nastanka pukotine.

U radu je potrebno navesti korištenu literaturu i eventualno dobivenu pomoć.

Zadatak zadan:
30. studenog 2017.

Rok predaje rada:
1. rok: 23. veljače 2018.
2. rok (izvanredni): 28. lipnja 2018.
3. rok: 21. rujna 2018.

Predviđeni datumi obrane:
1. rok: 26.2. - 2.3. 2018.
2. rok (izvanredni): 2.7. 2018.
3. rok: 24.9. - 28.9. 2018.

Zadatak zadao:

Prof.dr.sc. Zdravko Schauerl

Predsjednik Povjerenstva:

Izv. prof. dr. sc. Branko Bauer

SADRŽAJ

SADRŽAJ.....	II
POPIS SLIKA.....	III
POPIS TABLICA.....	V
POPIS OZNAKA.....	VI
SAŽETAK.....	VII
SUMMARY.....	VIII
1. UVOD.....	I
2. OKVIR AUTOMOBILA.....	1
2.1 Uloga okvira u motornom vozilu.....	2
2.2 Vrste okvira	2
2.2.1 Okvir ljestve.....	2
2.2.2 X-okvir.....	3
2.2.3 Rešetkasti(cjevasti) okvir.....	4
2.2.4 <i>Subfrane</i> okvir.....	4
2.3 Materijali za izradu okvira.....	6
2.3.1 Vrste čelika.....	6
2.3.1.1 Niskolegirani čelik.....	6
2.3.1.2 Čelici visoke čvrstoće.....	6
2.3.1.3 Ultračvrsti čelici.....	6
2.3.2 Aluminijski.....	7
2.3.3 Kompoziti ojačani ugljičnim vlaknima.....	7
2.3.4 Usporedba mehaničkih svojstava.....	8
3. UZORAK ZA ANALIZU.....	9
3.1 Materijal uzorka.....	10
3.1.1 Dodatni materijal.....	12
3.1.2 Postupak TIG zavarivanja.....	12
3.2 NERAZORNA ISPITIVANJA.....	16
3.3.1 Endoskopsko ispitivanje.....	16
3.2 Radiografsko ispitivanje.....	18
3.2.1 Parametri radiografa.....	19
4. ANALIZA MIKROSTRUKTURE.....	21

4.1 Rezanje uzorka.....	21
4.2 Ulijevanje uzorka u polimernu masu.....	23
4.2.1 Brušenje.....	24
4.2.2 Poliranje.....	24
4.2.3 Nagražanje.....	24
4.3 Analiza mikrostrukture.....	25
4.3.1 Uzorak 1.....	26
4.3.2 Uzorak 2 i 3.....	27
4.4 Mjerenje mikrotvrdoće.....	31
4.4.1 Mjerenje mikrotvrdoće na uzorku 1.....	33
4.4.2 Mjerenje mikrotvrdoće na uzorku 2.....	34
5. ZAKLJUČAK.....	35
LITERATURA.....	36
PRILOZI.....	37

POPIS SLIKA

Slika 1.	Klasični okvir motornog vozila	1
Slika 2.	Izgled okvira ljestve	2
Slika 3.	X-okvir	3
Slika 4.	Rešetkasti okvir	4
Slika 5.	Subframe okvir kod sportskog automobila Lamborghini Aventado.....	6
Slika 6.	Oplata automobila izrađena od kompozita ojačanog ugljičnim vlaknima.....	7
Slika 7.	Prednja strana uzorka	9
Slika 8.	Plastična deformacija uzorka.....	9
Slika 9.	TIG zavar	10
Slika 10.	Pukotina na uzorku	10
Slika 11.	Pukotina na uzorku	11
Slika 12.	Shematski prikaz procesa TIG zavarivanja.....	13
Slika 13.	Uspostava električnog luka visokofrekventnim generatorom.....	14
Slika 14.	Izgled električnog luka	14
Slika 15.	OLYMPUS Ultra LITE	16
Slika 16.	ZUT s unutrašnje strane uzorka	17
Slika 17.	Početak pukotina	17
Slika 18.	Elektromagnetski spektar podijeljen po valnim duljinama	18
Slika 19.	Uzorak: a)Pripremljen za radiografsku analizu b)radiogram.....	19
Slika 20.	Uređaj za radiografsko ispitivanja	20
Slika 21.	Radiogram zavora	20
Slika 22.	Rezanje uzorka na pola	21
Slika 23.	Mjesto rezanja 1. uzorka.....	22
Slika 24.	Mjesto rezanja 3. uzorka	22
Slika 25.	Mjesto rezanja 2. uzorka	22
Slika 26.	Rezanje uzorka na karakterističnim mjestima.....	22
Slika 27.	Uređaj za učvršćivanje uzorka (zalijevanje) u polimernoj masi (topli postupak).23	
Slika 28.	Uzorak u polimernoj masi	25
Slika 29.	Presjek zavora i ZUT-a	26
Slika 30.	Poroziteti i nemetalni uključci	26
Slika 31.	Poroziteti.....	27
Slika 32.	Zona utjecaja topline.....	27
Slika 33.	Mjesta feritno-perlitne i martenzitne strukture	28
Slika 34.	Grubozrnata martenzitna struktura	28
Slika 35.	Sitnozrnata feritno-perlitna struktura	28
Slika 36.	Pukotina na liniji staljivanja	29
Slika 37.	Uzorak 2.....	30
Slika 38.	Uzorak 3.....	30
Slika 39.	Uzorak 2 pukotina.....	31
Slika 40.	Uzorak 3 pukotina	32
Slika 41.	Izgled otiska koji se javlja pri mjerenju tvrdoće po vickersu	33
Slika 42.	Raspored mjerenja mikrotvrdoće na zavaru	34

Slika 43. Raspored mjerenja mikrotvrdoće na uzorku 2.....	34
---	----

POPIS TABLICA

Tablica 1. Usporedba mehaničkih svojstava.....	8
Tablica 2. Kemijski sastav 25CrMo4.....	11
Tablica 3. Mehanička svojstva 25CrMo4	11
Tablica 4. Mehanička svojstva CrMo1 žice	12
Tablica 5. Parametri ispitivanja	19
Tablica 6. Vrijednosti sila opterećivanja za Vickersovu metodu.....	30
Tablica 7. Vrijednosti mikrotvrdoća za zavar.....	31
Tablica 8. Vrijednost mikrotvrdoće u području pukotine uzorka 1.....	34
Tablica 9. Vrijednost mikrotvrdoće u području pukotine uzorka 2.....	34

POPIS OZNAKA

Oznaka	Jedinica	Opis
$Rp_{0,2}$	N/mm^2	Granica razvlačenja
Rm	N/mm^2	Vlačna čvrstoća
A	mm/mm	Istezanje
E	N/mm^2	Modul elastičnosti
d_{v1}	mm	Duljina dijagonale

SAŽETAK

Na ispitnom uzorku uslijed vanjskog opterećenja došlo je do pojave loma dijela šasije izrađene od 25CrMo4 čelika.

Karakterizacijom materijala i analizom zavora ispitan je utjecaj zavora i ZUT-a na svojstva šasije u području pukotine. Karakterizacija materijala uključuje svjetlosnu i elektronsku mikroskopiju. Analiza zavora uključuje vizualni pregled izgleda zavora, endoskopiju, rendgenska ispitivanja, pronalazak poroziteta i uključina, te mjerenje mikrotvrdoće zavora, ZUT-a i osnovnog materijala.

Ključne riječi: 25CrMo4 čelik, TIG zavarivanje, šasija

SUMMARY

Due to external load, crack has formed on the test sample made of 25CrMo4 steel.

Using materials characterization methods and weld analysis to determine the affect of welds and heat affected zone on the chassis properties in the crack area.

Material characterization includes optical and electron microscopy. Veld analyzation includes veld visual examination, endoscopy, radiography, finding porosity and incidence, and measuring microhardness of the veld, HAZ, and base material.

Keywords: 25CrMo4 steel, TIG welding, chassis

UVOD

U ovom radu koristeći se metodama karakterizacije materijala i analize zavora potrebno je utvrditi uzroke nastanka pukotine. Pukotina je nastala u području zavora dijela šasije izrađene od 25CrMo4 čelika. Karakterizacija materijala uključuje svjetlosnu i elektronsku mikroskopiju.

Analiza zavora uključuje vizualni pregled izgleda zavora i endoskopiju, rendgenska ispitivanja, pronalazak poroziteta i uključina, te mjerenje mikrotvrdoće zavora, ZUT-a i osnovnog materijala.

Analizom lomova i havarija omogućujemo pronalazak mogućih pogrešaka pri konstruiranju ili izradi dijelova, ukazujemo na moguće unapređenje postojećih tehnologija izrade.

2. OKVIR AUTOMOBILA

Okvir vozila je glavna noseća struktura motornog vozila na kojoj su povezane sve druge komponente, do 1930-ih, gotovo je svaki automobil imao strukturalni okvir, odvojen od svoje karoserije. Ovaj dizajn konstrukcije poznat je kao šasija na okviru. S vremenom su gotovo svi putnički automobili prešli na jedinstvenu konstrukciju, što znači da su njihova podvozja i karoserija integrirani jedan u drugi [1].



Slika 1. Klasični okvir motornog vozila [2]

Gotovo svi kamioni, autobusi i većina teretnih vozila i dalje rabe zaseban okvir zbog jeftinog dizajna i primarnog zahtjeva na nosivost [1].

2.1. Uloga okvira u motornom vozilu

Glavne funkcije okvira u motornom vozilu:

1. Povezati mehaničke komponente vozila i karoseriju
2. Upijanje statičkih, dinamičkih opterećenja i vibracija.

Neka od karakterističnih opterećenja:

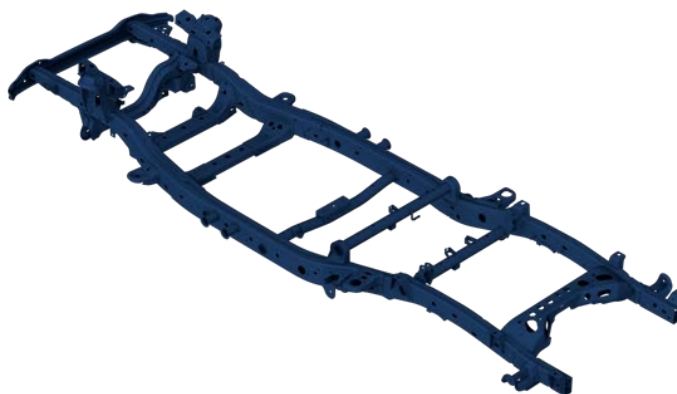
1. Masa automobila, putnika i tereta.
2. Vertikalna i torzijska opterećenja koja se prenose prilikom prelaska preko neravnih površina.
3. Poprečne bočne sile uzrokovane uvjetima na cesti, bočnim vjetrom i skretanjem vozila.
4. Zakretni moment motora i mjenjača.
5. Uzdužne vlačne sile od pokretanja i ubrzavanja, kao i od kočenja. Iznenadni učinci od sudara [3].

2.2 Vrste okvira

Kroz povijest motornih vozila razvio se niz dizajna okvira, svaki sa ciljem smanjenja mase i povećanja dopuštenih opterećenja na automobil.

2.2.1 Okvir ljestve

Jedan od najjednostavnijih i najstarijih dizajna okvira. Okvir se sastoji od dvije simetrične grede koje prolaze cijelom duljinom vozila, te nekoliko poprečnih elemenata koji ih povezuju. Izvorno se primjenjivao na gotovo svim vozilima.



Slika 2. Izgled okvira ljestve [4]

Ovaj dizajn nudi dobra nosiva svojstva, jeftin dizajn i izradu ali slabu otpornost na torziju i savijanje [3].

2.2.2 X-okvir

Ovaj se dizajn koristio za američke modele General Motors-a krajem pedesetih i početkom šezdesetih godina prošlog stoljeća, u kojem su grede povezane u sredini vozila čime je postignuta manja ukupna visina vozila bez obzira na povećanje veličine prijenosa i pogonskog vratila.



Slika 3. X-okvir [5]

Dizajn nije imao bočne grede te nije pružao odgovarajuću zaštitu od bočnog sudara, zbog čega je zamijenjen *perimeter* okvirom [4].

2.2.3 Rešetkasti(cjevasti) okvir

U rešetkastom okviru, ovjes, motor i karoserija pričvršćeni su na trodimenzionalni okvir izrađen od cijevi povezani zavarivanjem, karoserija ima vrlo malo ili nimalo strukturne funkcije. Kako bi se povećala čvrstoća i smanjila masa okvira, cijevi se zavaruju u obliku trokuta [3].

Ovaj se dizajn i danas koristi kod nekih sportskih i trkaćih automobila zbog svoje male mase i visoke čvrstoće koja se postiže koristeći tanke cijevi.



Slika 4. Rešetkasti okvir [6]

2.2.4 *Subframe* okvir

Subframe (podsklop) je okvir koji se sastoji od više zasebnih cjelina koje se povezuju zavarivanjem ili vijcima. Danas je najkorišteniji okvir u trkaćim i sportskim automobilima, moguće je koristiti različite materijale za svaki podsklop čime se postiže idealan omjer čvrstoće i mase.

Kod sportskih automobila uobičajena je upotreba ugljičnih vlakana za centralni dio vozila ili monokok (kabina vozila) čime se postiže maksimalna sigurnost putnika.

Prednji i stražnji podsklop se izrađuju od čeličnih profila koji služe za prihvatanje ovjesa, motora, prijenosa i kotača [6].



Slika 5. Podsklop okvir kod sportskog automobila Lamborghini Aventador [7]

U slučaju sudara i prekomjernog opterećenja na podsklop dolazi do odvajanja prednjeg ili stražnjeg dijela čime se odvodi dio kinetičke energije i smanjuju posljedice sudara na putnike vozila.

2.3. Materijali za izradu okvira

Kod izrade okvira potrebno je postići što manju masu i cijenu obzirom na očekivana opterećenja koja će se javiti tijekom vožnje automobila.

Neki od najkorištenijih materijala su čelik, aluminij te kod sportskih automobila polimerni kompoziti ojačani ugljičnim vlaknima.

2.3.1 Vrste čelika

Čelik je danas najkorišteniji materijal u automobilske industriji zbog dobrog omjera cijene i mehaničkih svojstava. Tokom godina razvio se niz vrsta čelika koji zadovoljavaju sve rigoroznije zahtjeve na mehanička svojstva.

2.3.1.1 Niskolegirani čelik

Niskolegirani ili konstrukcijski čelici uglavnom imaju feritnu mikrostrukturu. Ovi čelici imaju vlačnu čvrstoću do 280 N/mm^2 i vrlo su jednostavni za oblikovanje. Konstrukcijski čelici su nekad bili dominantni materijali za izradu karoserija automobila, ali je danas njihova upotreba ograničena na komponente kod kojih se traži niska krutost i kozmetičke dijelove kod kojih je potrebno kompleksno savijanje [8].

2.3.1.2 Čelici visoke čvrstoće

Niskolegirani ugljični-manganski čelici legirani su elementa za mikrolegiranje kao što su titan, vanadij itd. Ovi čelici imaju vlačnu čvrstoću do 800 N/mm^2 , dijelovi izrađeni od ovih čelika i dalje mogu biti izrađeni prešanjem. **HSLA** je jedan od prvih zajednički korištenih čelika visoke čvrstoće u automobilske industriji, oni su u uporabi od 1990. **HSLA** čelici se još uvijek koriste u mnogim automobilima [8].

2.3.1.3 Ultračvrsti čelici

Ultračvrsti čelici spadaju u skupinu čelika vlačne čvrstoće preko 1000 N/mm^2 , primjenom ovih čelika omogućuje se izvedba što lakše konstrukcije i što bolja iskoristivost materijala. Visoka vrijednost vlačne čvrstoće postiže se korištenjem legiranih elementa kao Si, Mn, Cr, Ni, Mo, V i nizom mehanizama očvršćuća [8].

2.3.2 Aluminij

Aluminij je materijal koji se sve više upotrebljava u automobilske industriji, glavna prednost u usporedbi sa čelikom je 2,9 puta manja gustoća čime se postiže ušteda na masi dijelova. Vlačna čvrstoća do 700 N/mm^2 , uz dobru istezljivost. Mehanička svojstva se postižu legiranjem Mn, Mg, Cu, Zn, te nizom toplinskih obrada.

2.3.3 Kompoziti ojačani ugljičnim vlaknima

Kompozitni materijali ili kompoziti su proizvedeni umjetnim spajanjem dvaju ili više materijala različitih svojstava s jasnom granicom između njih. Posljedica je dobivanje materijala takvih svojstava kakva ne posjeduje niti jedna komponenta sama za sebe [9]. Jedan od najčešće korištenih kompozitnih materijala u proizvodnji dijelova za sportske i trkaće automobile je kompozit ojačan ugljičnim vlaknima, koristi se za izradu dijelova šasijske, nosivih dijelova te oplata automobila.



Slika 6. Oplata automobila izrađena od kompozita ojačanog ugljičnim vlaknima [10]

Općenito su za ugljična vlakna karakteristična sljedeća svojstva: velika čvrstoća (3000 N/mm^2 do 5000 N/mm^2) i velik modul elastičnosti (kod grafitnih vlakana $200\,000 \text{ N/mm}^2$ do $450\,000 \text{ N/mm}^2$), velika krutost, razmjerno mala gustoća u odnosu na metalne niti ($1,5 \text{ N/mm}^2$ do $2,2 \text{ g/cm}^3$), izvrsna otpornost na toplinu uz istodobnu stabilnost dimenzija (termički raspad u području $3600 \text{ }^\circ\text{C}$ do $4000 \text{ }^\circ\text{C}$), veoma slaba gorivost, kemijska inertnost, nekorozivnost, otpornost na kiseline, lužine i organska otapala, dobra toplinska i električna vodljivost, nemagnetičnost, vrlo mala apsorpcija rendgenskih zraka, neupijanje vlage i izvrsna biokompatibilnost [11].

2.3.4 Usporedba mehaničkih svojstava

U tablici 1. prikazana su neka mehanička svojstva i cijena različitih materijala koji se koriste u izradi okvira automobila. Porastom zahtjeva za mehaničkim svojstvima dijela neizbježno raste i cijena po kilogramu, kod izbora materijala potrebno je uzeti u obzir omjer čvrstoće i mase jer uz zadanu čvrstoću želimo postići minimalnu masu dijela.

Tablica 1. Usporedba mehaničkih svojstava

Materijal	Gustoća, <i>kg/m³</i>	Vlačna čvrstoća <i>MPa</i>	Modul elastičnosti <i>GPa</i>	Cijena po jedinici mase <i>kn/kg</i>
P460NL1	7700	700-800	200	5-9
30CrMoV 9	7800	1100-1300	210	9-12
AlMg4,5Mn	2650	300-350	70	15-25
Ugljična vlakna (tkanina)	1500-2000	3000-5000	200-400	1000

3. EKSPERIMENTALNI DIO

Uzorak je dio okvira automobila koji je izrađen od legure čelika 25CrMo4, zavaren postupkom TIG zavarivanja. Dodatni materijal za zavarivanje koji je korišten također je CrMo legura, zaštitna atmosfera u postupku zavarivanja je argon 5.0.



Slika 7. Prednja strana uzorka

Dostavljena cijev je plastično deformirana s time da je najveća deformacija na mjestu pojave pukotine. Pukotina se proteže poprečno po cijevi i prolazi kroz područja cijevi koja su bila i tlačno i vlačno opterećena.



Slika 8. Plastična deformacija uzorka



Slika 9. TIG zavar

Na slici 9. vidljiva je karakteristična kapljica najvjerojatnije nastala tijekom zavarivanja. Kapljicu je potrebno posebno analizirati zbog mogućeg utjecaja na nastanak pukotine.



Slika 10. Pukotina na uzorku



Slika 11. Pukotina na uzorku

3.1. Materijal uzorka

25CrMo4 je čelik pogodan za toplinsku obradu i lako se zavaruje, spada u kategoriju čelika za poboljšavanje. Očekivana vlačna čvrstoća je od 700 N/mm^2 do 950 N/mm^2 . 25CrMo4 čelik koristi se za izradu komponenata u automobilima i zrakoplovima s velikom traženom čvrstoćom kao okviri, osovine, vratila, dijelovi turbina [12].

Tablica 2. Kemijski sastav 25CrMo4

Kemijski sastav %	C	Si	Mn	Cr	Mo
	0,25	0,25	0,70	1,05	0,25

Tablica 3. Mehanička svojstva 25CrMo4

Mehanička svojstva	Tvrdoća, HV0,2	$R_{p0,2}$, MPa	R_m , MPa	A, %
	230-300	400-700	650-1000	12-16

Poboljšavanje je postupak koji se sastoji od kaljenja i visokotemperaturnog popuštanja. Čelik se zagrijava do temperature austenitizacije, nakon čega se brzo hladi.

Nakon kaljenja provodi se popuštanje. Postupak popuštanja sastoji se od zagrijavanja čelika na temperaturu ispod temperature austenitizacije, izotermnog držanja na toj temperaturi neko vrijeme i sporog hlađenja. Temperatura popuštanja određuje se prema zahtjevima dijela.

Poboljšanje vršimo u pećima sa zaštitnom atmosferom što u velikoj mjeri sprječava oksidaciju i razugljičenje površine.

3.1.1 Dodatni materijal

CrMo1 žica koristi se za zavarivanje TIG postupkom termički postojanih čelika, te nelegiranih i niskolegiranih čelika. Žica je pobakrena te se koristi za zavarivanje cijevi, posuda koje rade pod visokim tlakom i armatura. Zavar izrađen CrMo1 žicom može izdržati radne temperature od 550 C° [13] .

Tablica 4. Mehanička svojstva CrMo1 žice

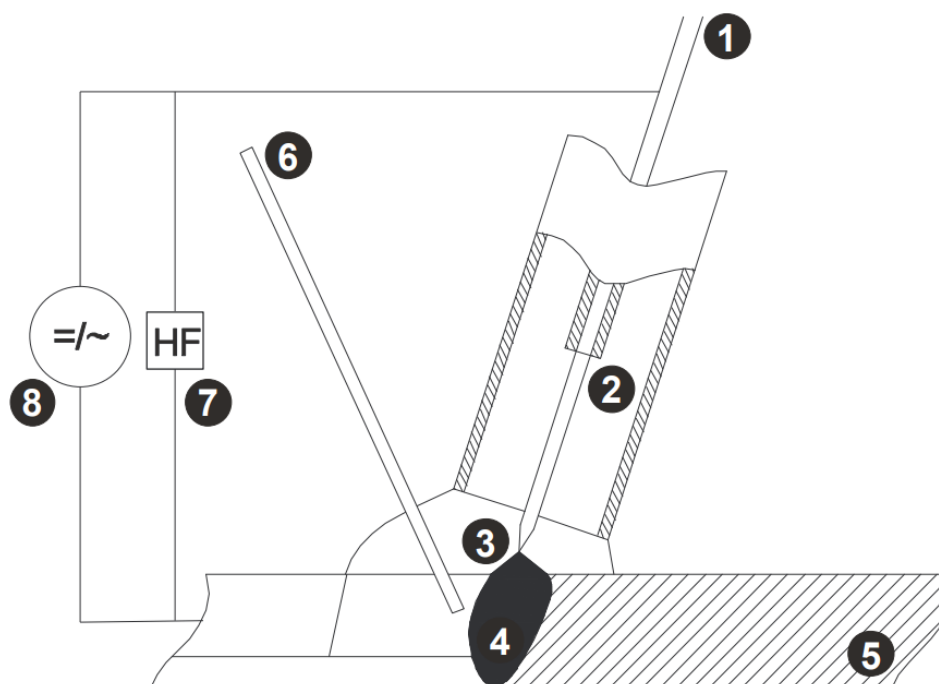
Mehanička svojstva	Udarna žilavost, J (pri 20C°)	Vlačna čvrstoća, MPa	A, %
	>80	>560	>22

3.1.2 Postupak TIG zavarivanja

TIG postupak zavarivanja je elektrolučni postupak zavarivanja netaljivom elektrodom u zaštitnoj atmosferi inertnog plina (Ar, He) ili rjeđe smjesi plinova. Skraćenica imena postupka dolazi od punog naziva "Tungsten Inert Gas", a često se naziva i WIG (Wolfram Inert Gas).

Kod TIG postupka zavarivanja električni luk uspostavlja se između netaljive volframove elektrode i osnovnog materijala. Zona utjecaja topline, rastopljeni osnovni materijal i volframova elektroda zaštićeni su atmosferom inertnog plina. Proces zavarivanja izvodi se s dodatnim materijalom ili bez njega (pretaljivanje).

Netaljiva elektroda služi isključivo za uspostavu električnog luka, a njezino trošenje rezultat je termičkih opterećenja ili mehaničkih oštećenja. Također, netaljiva elektroda svojom geometrijom utječe na karakteristiku električnog luka [14].



Slika 12. Shematski prikaz procesa TIG zavarivanja [14]:

- 1) netaljiva elektroda, 2) sapnica gorionika, 3) električni luk, 4) rastaljeni materijal, 5) osnovni materijal, 6) dodatni materijal, 7) visokofrekventni generator, 8) izvor struje

Električni luk kod ovog postupka zavarivanja sastoji se od tri područja: katodnog, anodnog i područja stupa električnog luka. Anodno područje (područje plus pola) i katodno područje (područje minus pola) malih su duljina, a sastoje se od oblaka iona koji udaraju u anodu tj. katodu te oslobađaju određenu količinu energije (topline).

Temperature koje se razvijaju kod TIG postupka zavarivanja funkcija su osnovnih parametara zavarivanja, vrsti zaštitnog plina te vrsti osnovnog materijala, a u samoj osi plazme električnog luka mogu dosežati preko 20 000 °C

Električni luk, slika 13, uspostavlja se kontaktno (neposredno ili posredno) ili preko visokofrekventnog generatora, sklopa integriranog zajedno sa upravljanjem i izvorom struje za zavarivanje [14].



Slika 13. Uspostava električnog luka visokofrekventnim generatorom [14]

Područje stupa električnog luka, tj. njegova duljina ovisi o naponu električnog luka, a najčešće odgovara promjeru netaljive elektrode. Kako je po definiciji prema izvoru električni luk intenzivno izbijanje u smjesi plinova i para, slijedi da je glavni nosilac ionizacije kod ovog postupka zavarivanja upravo zaštitni plin, a o njemu ovisi također i uspostava i stabilnost luka [14].



Slika 14. Izgled električnog luka [14]

Najčešći zaštitni plinovi koji se koriste u primjeni TIG postupka zavarivanja su plemeniti plinovi helij i argon. Iako se u izvornom obliku TIG procesa koristio helij, danas je argon taj koji je dominantan u primjeni.

Argon je najjeftiniji inertni plin koji se koristi kod TIG zavarivanja, ali to nije jedina njegova prednost. Ima niski ionizacijski potencijal (energija potrebna za uzimanje jednog elektrona atoma plina da ga pretvori u ion), 15,7 eV, što olakšava uspostavu i stabilnost električnog luka. Minimalna potrebna čistoća argona iznosi 99,95%, iznimno 99,997% [14].

Osnovne prednosti TIG postupka su [14]:

- koncentriranost električnog luka, smanjeni ZUT
- nema prskanja, nema troske
- minimalna količina štetnih plinova
- zavarivanje širokog spektra metala i njihovih legura
- mogućnost zavarivanja raznorodnih materijala
- mogućnost izvođenja zavarivanja u svim položajima
- mogućnost zavarivanja pozicija male debljine
- pogodno za izvođenje reparaturnih radova

Osnovni nedostaci TIG postupka su [14]:

- mala brzina zavarivanja
- mali depozit dodatnog materijala
- neekonomičnost u zavarivanju debljih pozicija (iznad 6mm)
- zahtjeva se precizna priprema zavarenog spoja
- viša cijena opreme za zavarivanje i zaštitnih plinova
- zahtjevnost izvođenja ručnog TIG zavarivanja, duža izobrazba zavarivača
- otežanost izvođenja zavarivanja na otvorenim prostorima
- potreba za prisilnom ventilacijom zraka kod izvođenja zavarivanja u skućenim prostorima
- pojačana svijetlost i UV zračenje.

3.2. Nerazorna ispitivanja

Ispitivanja bez razaranja (IBR) ili nerazorna ispitivanja, (eng. NDT – Non-destructive testing) predstavljaju skup metoda temeljenih na principima fizike sa svrhom utvrđivanja svojstava materijala ili komponenata sustava, te otkrivanjem različitih vrsta nepravilnosti, a da pritom predmet ispitivanja ostane neoštećen [15].

Osnovni zadatak svih NDT metoda je pronalaženje nepravilnosti u osnovnom materijalu, kao i njegovim spojevima.

3.2.1. Endoskopsko ispitivanje

Često kod vizualne inspekcije uzorka nije moguće doći do svih površina bilo zbog geometrije uzorka ili nedostupnosti nekih površina, endoskop pomoću svoje kamere omogućuje dolazak do tih površina.

OLYMPUS Ultra LITE je endoskop koji se koristio u ispitivanjima. Uređaj se sastoji od kamere koja se nalazi na vrhu čelikom opletene cijevi dužine 3 m i zaslona koji reproducira sliku. Kamera ima mogućnost zakreta u 3 dimenzije pomoću komandi na uređaju.



Slika 15. **OLYMPUS Ultra LITE** [16]



Slika 16. ZUT s unutrašnje strane uzorka



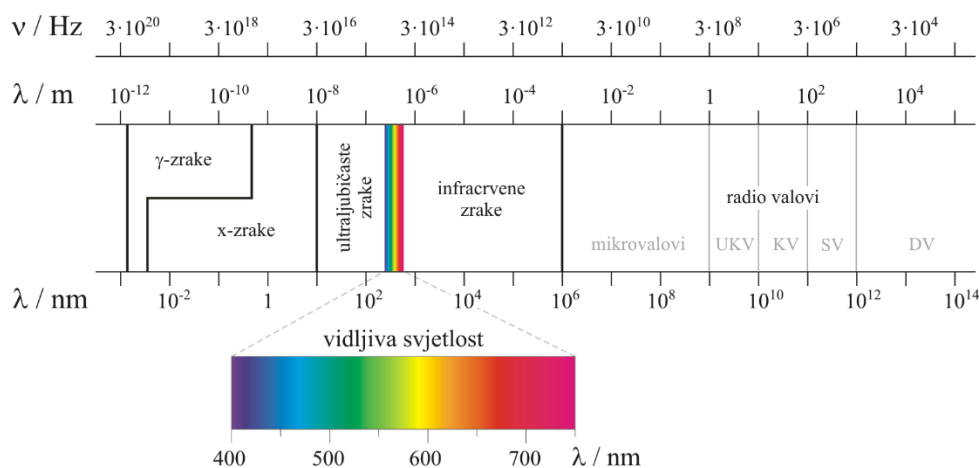
Slika 17. Početak pukotina

Pregled unutarnjeg dijela uzorka provedeno je endoskopom i pokazao je promijenjenu površinu unutarnje strane cijevi na području zavora kao posljedica unosa topline tijekom postupka zavarivanja

3.3. Radiografsko ispitivanje

Radiografija je metoda nerazornih ispitivanja dijelova i sklopova koja se temelji na razlikama u apsorpciji zračenja dijela ili cijelog komada koji se ispituje. Količina zračenja koje će predmet apsorbirati ovisi o apsorpcijskim karakteristikama samog materijala, kao i gustoći i debljini istog.

Rendgensko zračenje je elektromagnetsko zračenje valova kratkih valnih duljina, energija od 150 eV do 20 MeV , a po svojoj prirodi je umjetno. Nastanak rendgenskog zračenja povezano je sa smanjivanjem brzine i skretanjem ubrzanih elektrona (**Bremsstrahlung** efekt - proces zakočnog zračenja) u električnom polju jezgre atoma. Izvor X zračenja u industrijskoj je radiografiji najčešće rendgenska cijev sa užarenom katodom, a po svojoj građi može biti jednopolna i dvopolna [17].



Slika 18. Elektromagnetski spektar podijeljen po valnim duljinama [18]

Cilj radiografskog ispitivanja je pronalazak mogućih grešaka u zavaru kao što su poroziteti, nečistoće, nedovoljno staljivanje itd. Različiti su načini očitavanja intenziteta zračenja dobivenih prolazom kroz ispitni objekt poput zapisa na filmu, papiru, slika „real-time“, grafički, i dr. Najčešći i općenito najprihvaćeniji zapis u radiografiji je snimanje trajne slike odnosno radiograma. Radiogrami nastaju prolazom zračenja kroz ispitni objekt, a njihova slika zapisuje se na film ili radiografski papir [19].

3.3.1 Parametri radiografa

Prilikom izrade radiograma potrebno je podesiti niz parametara koji ovise o dimenzijama, debljini, vrsti materijala uzorka i željenoj točnosti i rezoluciji radiograma.

Rendgen - **BALTEAU GM 300D**

Skener - **VMI 3600SF**

Slikovna ploča - **Industrex XL blue** 14" x 17"

Tablica 5. Parametri ispitivanja

Napon, kV	150
Struja, mA	3
Vrijeme ekspozicije, s	150
FF udaljenost, mm	700
Napon lasera, V	15
Napon fotomultiplikatora, V	5.25
Rezolucija skeniranja, μm	50



a)



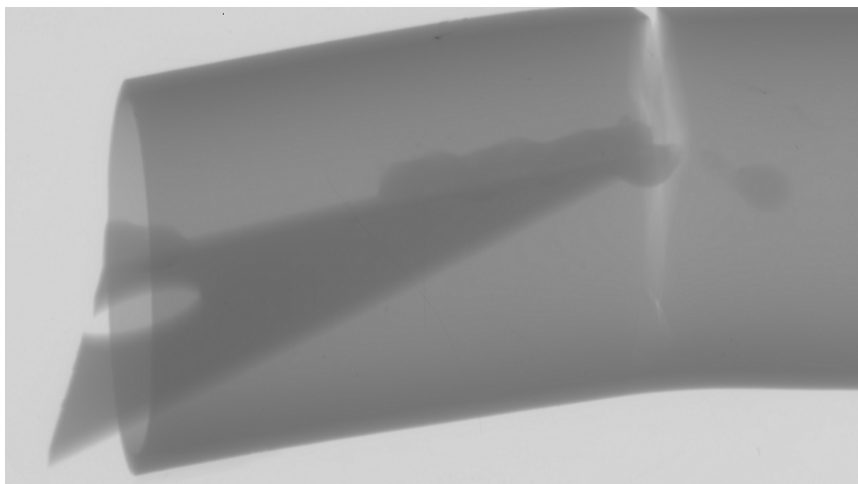
b)

Slika 19. Uzorak: a) Pripremljen za radiografsku analizu b) radiogram

Analizom radiograma nisu uočene dodatne greške niti pukotine u analiziranom dijelu cijevi.



Slika 20. Uređaj za radiografsko ispitivanja



Slika 21. Radiogram zavora

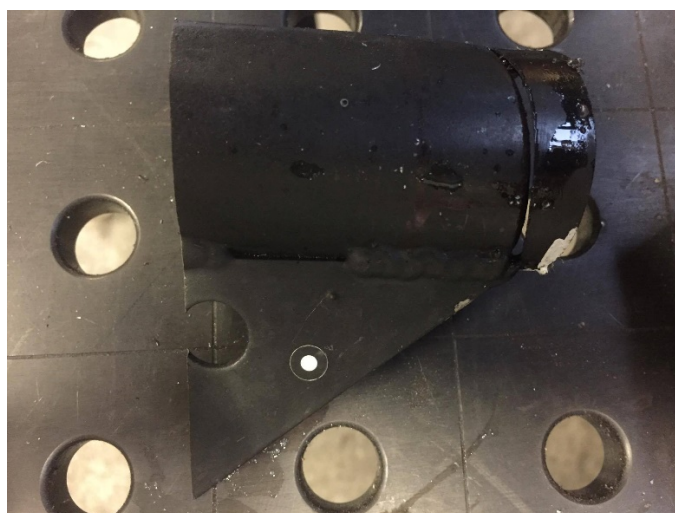
4. ANALIZA MIKROSTRUKTURE

Nastavak ispitivanja posveti će se razornim metodama ispitivanja koje uključuju: rezanje uzorka na karakterističnim mjestima koje je potrebno analizirati (materijal zavara, početak i kraj pukotine), ulijevanje uzorka u polimernu masu, brušenje, poliranje, i nagrizanje uzorka, analiza mikrostrukture na svjetlosnom mikroskopu te mjerenje mikrotvrdoće **Vickers** metodom.

4.1. Rezanje uzorka

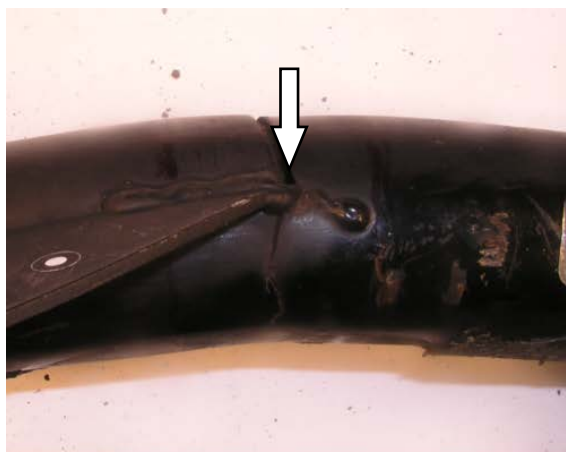
Zbog opasnosti od promjene strukture zavara ili osnovnog materijala uzorak je bilo potrebno izrezati ručnom pilom, sredstvo za hlađenje nije korišteno zbog malih temperatura koje se javljaju tijekom ručnog piljenja.

Za rezanje se koristila ručna pila za metal sa zubima od brzoreznog čelika, uzorak se pridržavao u škripcu.

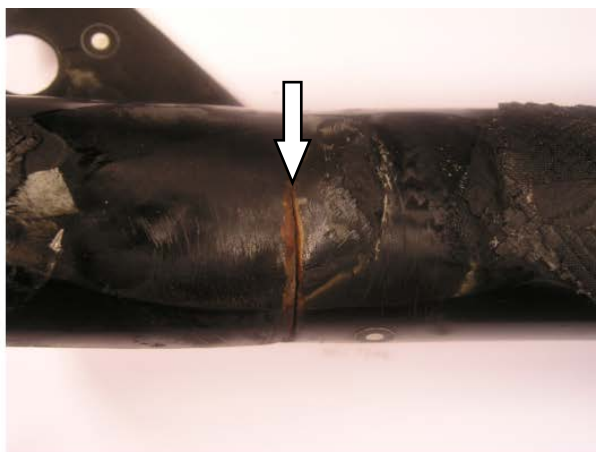


Slika 22. Rezanje uzorka na pola

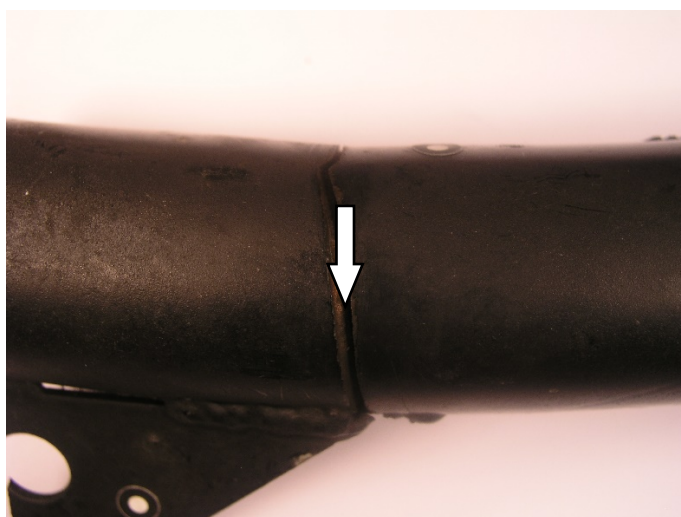
Na slikama 23, 24, 25 vidljiva su mjesta na kojima je izrezan uzorak za dobivanje metalografskih površina. Ispitne površine su okomite na smjer propagacije pukotine. Prvi uzorak se nalazi na mjestu zavara, uzorak 2 po sredini pukotine, uzorak 3 na kraju pukotine.



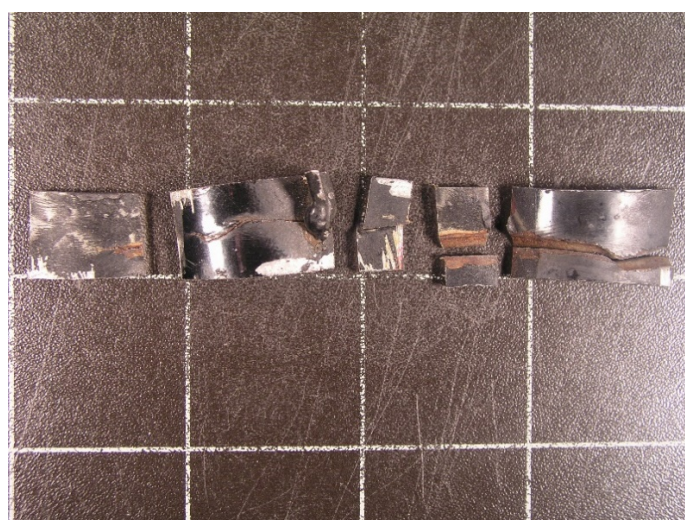
Slika 23. Mjesto rezanja 1. uzorka



Slika 24. Mjesto rezanja 3. uzorka



Slika 25. Mjesto rezanja 2. uzorka



Slika 26. Izrezani uzorci za metalografsku analizu

4.2. Ulijevanje uzorka u polimernu masu

Uzorak ulijevamo u polimernu masu iz više razloga:

- Zaštititi uzorak od vanjskih oštećenja
- Uniformni oblik uzorka za automatsku pripremu na strojevima za brušenje/poliranje i daljnju obradu i analizu.
- Na ulivenom uzorku se mogu bolje analizirati rubovi na kojima bi nam inače razne greške mogle promaknuti.

Uzorke ulijevamo u polimernu masu koja može biti duromerna ili plastomerna [20].



Slika 27. Uređaj za ulijevanje uzorka u polimernoj masi (topli postupak)

4.2.1 Brušenje

Bušenjem nastojimo skinuti sloj prljavštine, apsorbiranih plinova, oksida i plastično deformiranog sloja na uzorku, kako bi nam ostao materijal koji je referentan materijalu koji se ispituje [20].

Parametri brušenja [20]:

- Vrsta brusnog papira
- Kemijski sastav abraziva
- Zrnatost i oblik abraziva
- Sredstvo za podmazivanje
- Sila brušenja
- Vrijeme brušenja
- Brzina okretanja brusnog diska

4.2.2 Poliranje

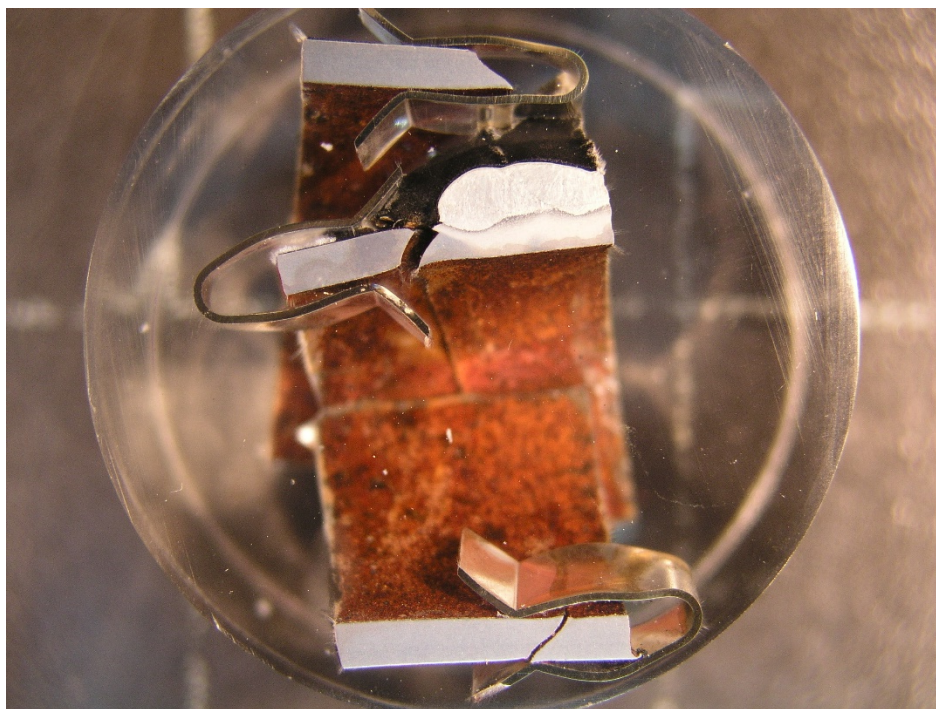
Poliranjem uzorak dovodimo do zrcalnog sjaja. Radi se na istom principu kao i kod brušenja, ali s manjim dimenzijama abrazivnih čestica koje daju sjajnu, glatku površinu. U poliranom stanju analiziramo porozitet, nemetalne uključke i pukotine [20].

4.2.3 Nagrizanje

Nagrizanje uzorka je postupak selektivnog korodiranja površine s namjerom da se istakne mikrostruktura uzorka. Na ovaj način možemo vidjeti kristalna zrna i ostale karakteristike materijala nevidljive u nenagriženom stanju. Parametri za nagrizanje su sredstvo za nagrizanje, vrijeme, temperatura ili jakost električne struje [20].

Sredstva za nagrizanje [20]:

- Kemijsko nagrizanje – obavlja se na čelicima, lakim i obojenim materijalima. Čelike nagrizamo u 3% nitalu (3% HNO_3 + alkohol)
- Elektrolitičko nagrizanje – postupak kojim se nagrizaju nehrđajući čelici
- Obojeno nagrizanje – svako zrno oboji se u drugu boju, koristi se za analizu granica zrna, ali otežava analizu mikrostrukture



Slika 28. Uzorak u polimernoj masi

4.3. Analiza mikrostrukture

Kod svjetlosnog mikroskopa, snop svjetlosti osvjetljava uzorak koji promatramo, svjetlost zatim prolazi kroz optički sustav koji omogućuje stvaranje povećane slike uzorka.

Optički sustav svjetlosnog mikroskopa sastoji se od niza leća koje usmjeravaju svjetlost. Svjetlost kojom se osvjetljava predmet prolazi kroz kondenzor koji može biti građen od jedne ili više leća, njegova uloga je sabiranje zrake svjetlosti na uzorku koji promatramo kako bi uzorak bio što bolje osvjetljen.

Svjetlosni mikroskopi omogućuju razlučivanje predmeta koji su međusobno udaljeni $0.2\ \mu\text{m}$, te postižu povećanje do 1000 puta [21].

Za analizu mikrostrukture korišten je svjetlosni mikroskop OLYMPUS GX51F-5 s pripadajućim programom za analizu slike.

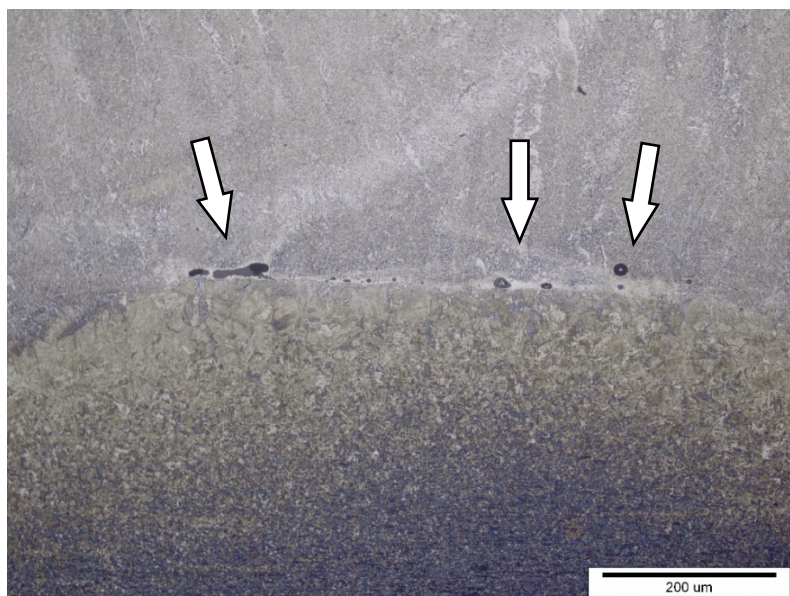
4.3.1 Uzorak 1

Na slici 29 vidljiva je struktura materijala uzorka uz pukotinu na mjestu zavora, osnovi materijal cijevi, široka zona utjecaja topline, linija staljivanja, te materijal zavora.



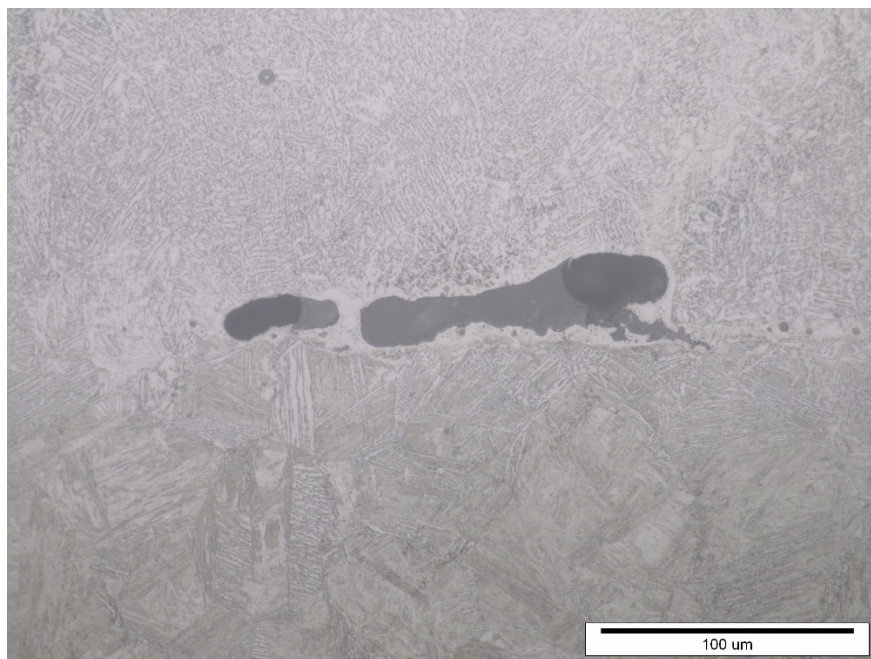
Slika 29. Presjek zavora i ZUT-a

Analizom mikrostrukture uzorka 1 vidljiva je grubozrnata mikrostruktura materijala zavora uobičajena za to područje.



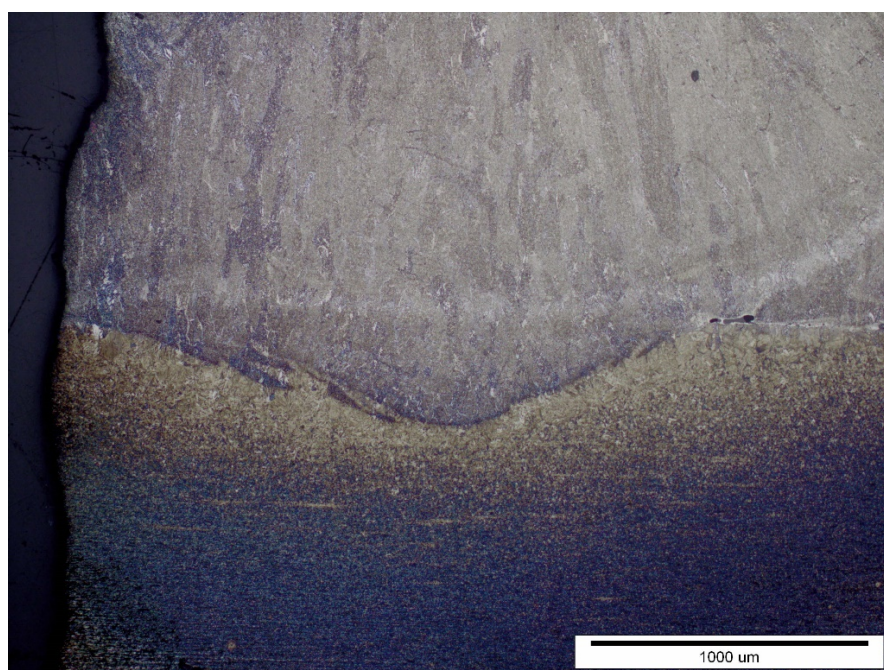
Slika 30. Poroziteti i nemetalni uključci

Na liniji staljivanja vidljive su greške u obliku poroziteta i nemetalnih uključina koje su nastale u postupku zavarivanja.

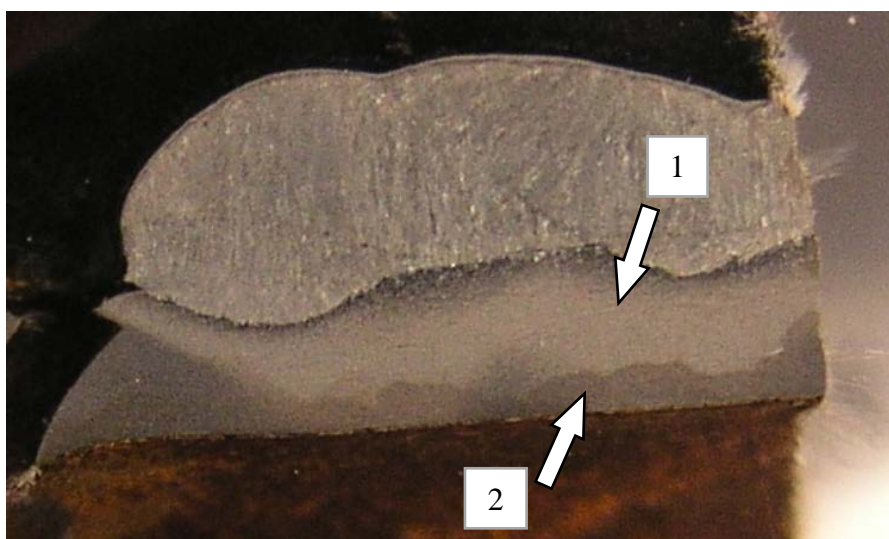


Slika 31. Poroziteti

Zona utjecaja topline na analiziranom mjestu je jako široka i u njoj su vidljive zone transformirane mikrostrukture. Uz liniju staljivanja u ZUT-u je prisutna grubozrnata strukturu u kojoj se javlja i krhka martenzitna faza.

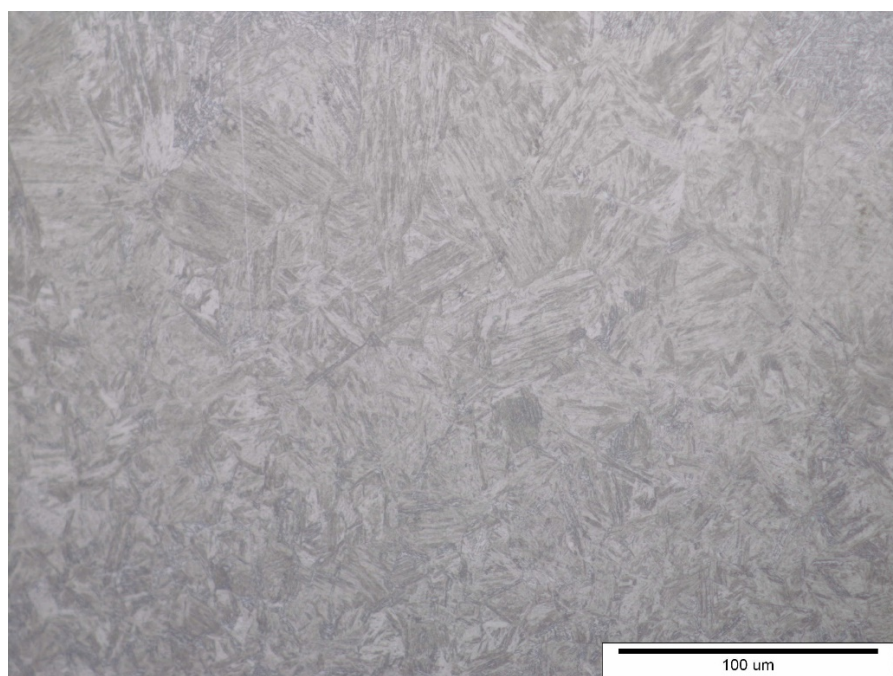


Slika 32. Zona utjecaja topline



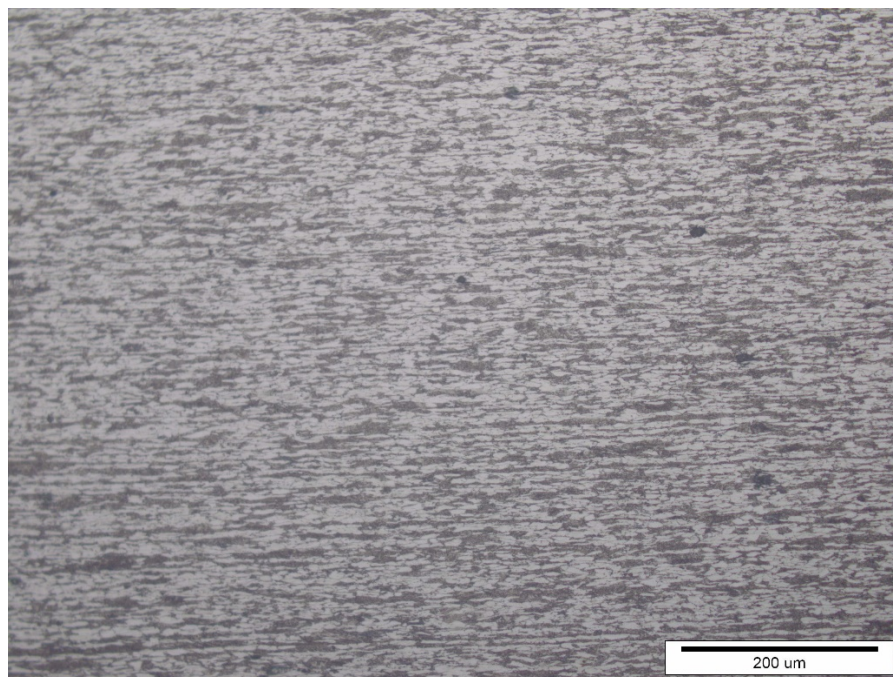
Slika 33. Mjesta feritno-perlitne i martenzitne strukture

Na slici 33. vidljiva su mjesta na kojima je fotografirana martenzitna struktura 1. i struktura osnovnog materijala 2.

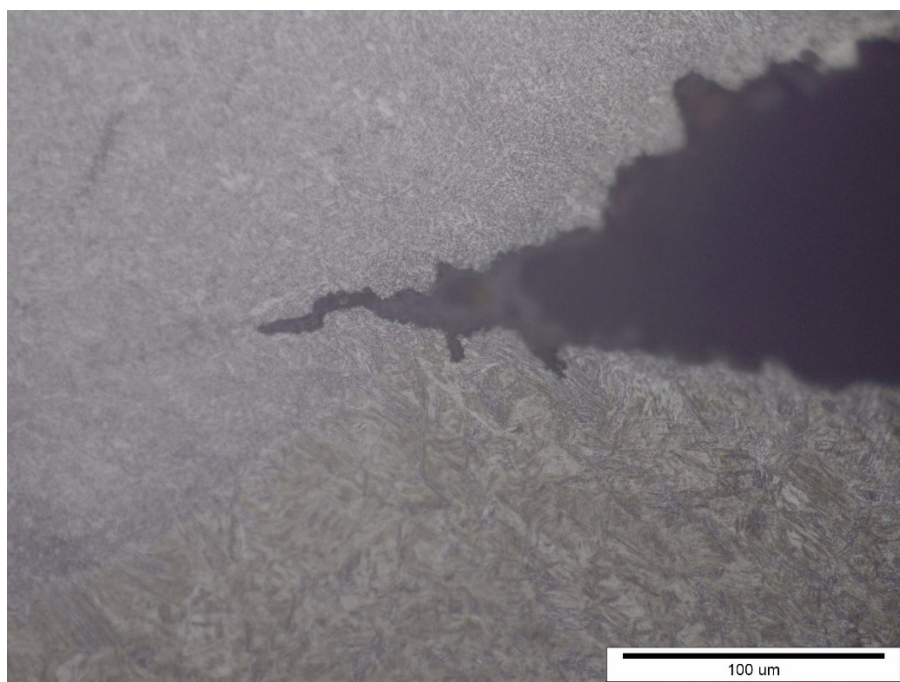


Slika 34. Grubozrnata martenzitna struktura

Od linije staljivanja prema osnovnom materijalu struktura postaje sitnozrnatija, a u osnovnom materijalu prelazi u feritno perlitnu mikrostrukturu uobičajenu za tu vrstu materijala, dodatno je uočena i druga pukotina koja se širi po liniji staljivanja.



Slika 35. Sitnozrnata feritno-perlitna struktura

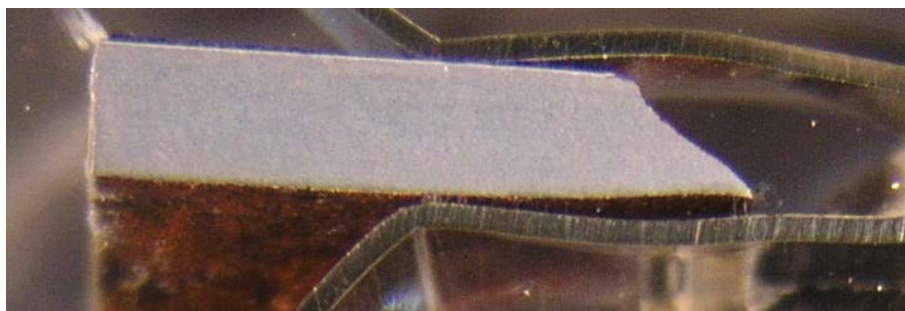


Slika 36. Pukotina na liniji staljivanja

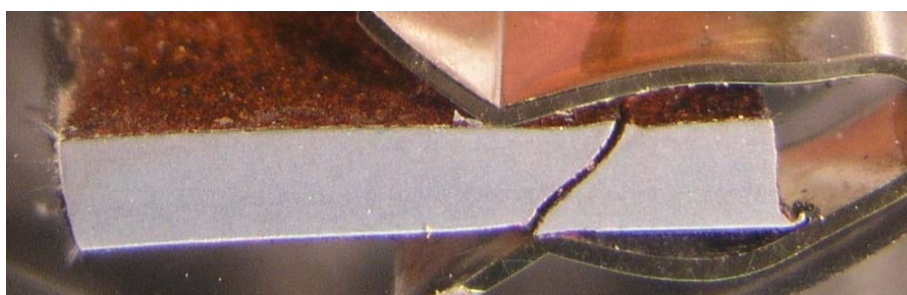
4.3.2 Uzorak 2 i 3

Uzorak 2 izrezan je iz sredine pukotine, uzorak 3 izrezan je na samom kraju pukotine.

Struktura uzoraka je feritno-perlitna karakteristična za osnovni materijal, bez vidljivih grešaka koje bi mogle narušiti mehanička svojstva.

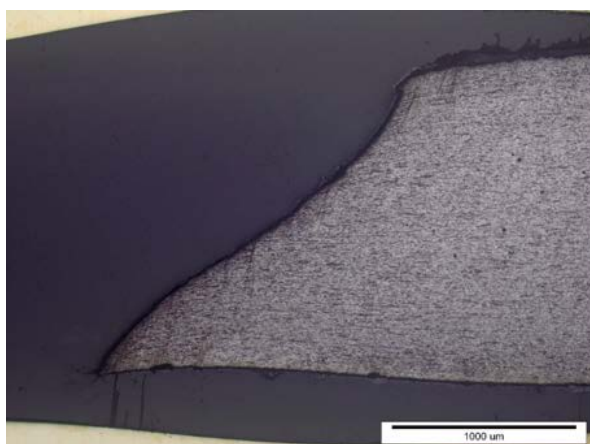


Slika 37. Uzorak 2

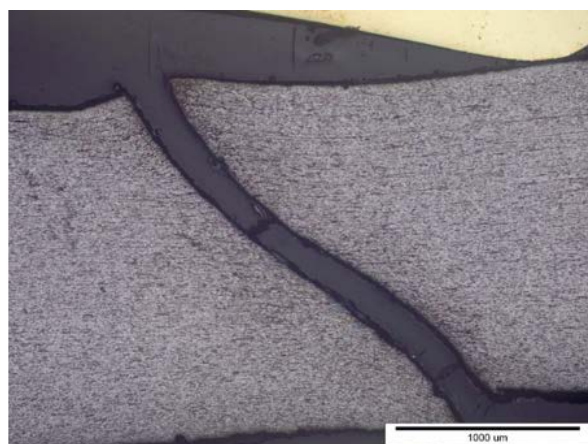


Slika 38. Uzorak 3

Na slikama 39,40 vidljive je plastična deformacija materijala u području pukotine nastala prekomjernim istezanjem materijala.



Slika 39. Uzorak 2 pukotina



Slika 40. Uzorak 3 pukotina

4.4. Mjerenje mikrotvrdoće

Svrha ispitivanja tvrdoće mikro-utiskivanjem je precizno mjerenje promjena tvrdoće u ispitivanom materijalu. Ta tehnika ispitivanja poznata je pod nazivom ispitivanje mikrotvrdoće; iako je pojam neprikladan jer ostavlja dojam da se radi o vrlo malim vrijednostima izmjerene tvrdoće.

Kod ispitivanja mikrotvrdoće sila opterećivanja ne prelazi 1,96 N. Koriste se Vickersova ili Knoopova metoda ispitivanja. Postupak je vrlo sličan standardnom Vickersovom ili Knoopovom postupku ispitivanju makrotvrdoće, samo što se radi na mikroskopskoj razini uz uređaje veće preciznosti i povećanja.

Ispitivana površina zahtijeva složeniju metalografsku pripremu, što je manja sila utiskivanja površina mora biti fino pripremljena. Za mjerenje veličine otisaka koriste se precizni mjerni mikroskopi, uobičajenog povećanja do nekoliko stotina puta.

Mjerenje mikrotvrdoće zahtijeva veliko iskustvo i preciznost da bi se postigla zadovoljavajuća točnost mjerenja [22].

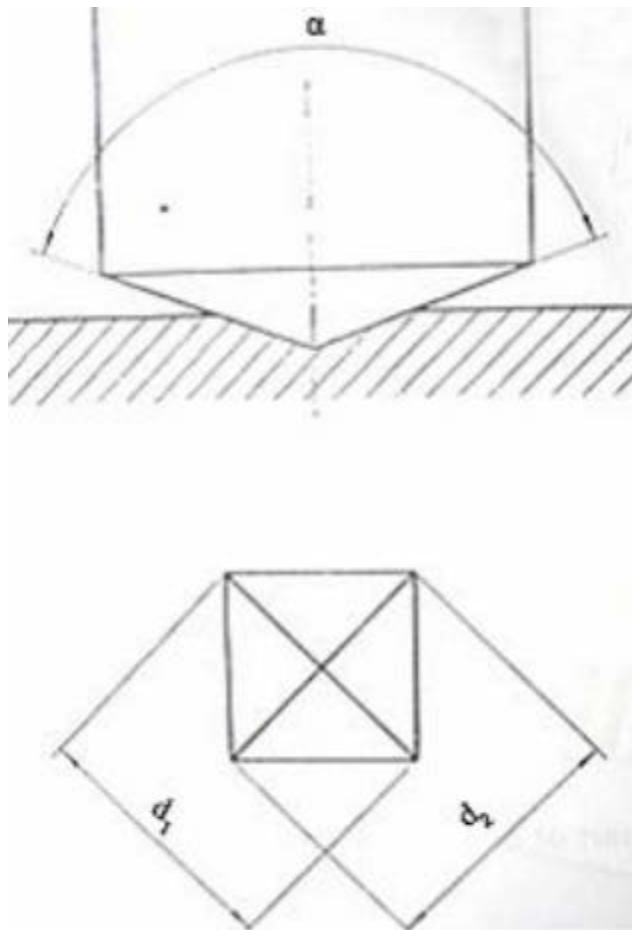
Tablica 6. Vrijednosti sila opterećivanja za Vickersovu metodu [22]

Konvencionalna tvrdoća ¹⁾		Semi-mikrotvrdoća		Mikrotvrdoća ²⁾	
Oznaka	Ispitna sila F [N]	Oznaka	Ispitna sila F [N]	Oznaka	Ispitna sila F [N]
HV 5	49,03	HV 0,2	1,961	HV 0,01	0,09807
HV 10	98,07	HV 0,3	2,942	HV 0,015	0,1471
HV 20	196,1	HV 0,5	4,903	HV 0,02	0,1961
HV 30	294,2	HV 1	9,807	HV 0,025	0,2452
HV 50	490,3	HV 2	19,61	HV 0,05	0,4903
HV 100	980,7	HV 3	29,42	HV 0,1	0,9807
¹⁾ Ispitne sile >980,7 [N] smiju se primjenjivati					
²⁾ Ispitne sile za mikrotvrdoću su preporučljive					

Kod Vickersove metode uklonjeni su glavni nedostaci drugih metoda mjerenja tvrdoće. Dva osnovna nedostatka ostalih metoda su: ograničeno područje mjerenja, te ovisnost tvrdoće o primijenjenoj sili utiskivanja.

Prvi nedostatak uklonjen je uporabom najtvrđeg materijala za indenter - dijamanta, a drugi oblikom indentora [22].

To je kod Vickersove metode četverostrana piramida s vršnim kutom između nasuprotnih stranica od 136° . Piramida na ispitnom uzorku ostavlja otisak oblika šuplje piramide, čija je baza kvadrat sa dijagonalama d_{v1} i d_{v2} kao što je prikazano slikom 41.

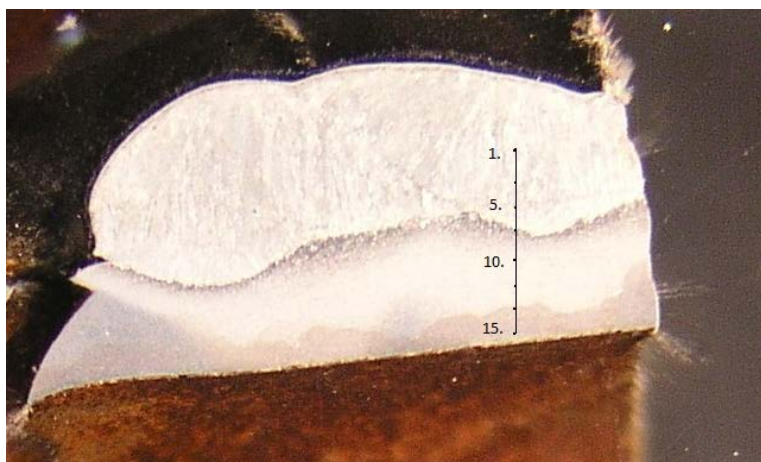


Slika 41 Izgled otiska koji se javlja pri mjerenju tvrdoće

Za izračun mikrotvrdoće potrebno je izračunati udaljenost između 2 dijagonale vrha otiska i zatim pomoću formule dolazimo do vrijednosti tvrdoće.

Za statistički valjane rezultate za jedan rezultat mikrotvrdoće uzorak je potrebno 3 puta ispitati i izračunati prosjek rezultata.

4.4.1 Mjerenje mikrotvrdoće na uzorku 1



Slika 42. Raspored mjerenja mikrotvrdoće na zavaru

Mikrotvrdoća kod uzorka 1 izmjerena je u liniji kroz materijal zavara preko linije staljivanja kroz ZUT do osnovnog materijala. Izmjerene vrijednosti prikazane su u tablici 7.

Tablica 7. Vrijednosti mikrotvrdoća za zavar

Mjerenje		HV0,2
Materijal zavara	1.	238
	2.	298
	3.	319
	4.	303
	5.	308
ZUT	6.	349
	7.	349
	8.	494
	9.	566
	10.	639
	11.	516
	12.	528
Osnovni materijal	13.	265
	14.	319
	15.	325

Mjerenjem mikrotvrdoće uočavamo porast tvrdoće u području ZUT-a, tvrdoće do 639 HV karakteristične su za tvrdi i krhku martenzitnu strukturu.

Tablica 8. Vrijednost mikrotvrdoće u području pukotine uzorka 1

Mjerenje		HV0,2
Pukotina	1.	216
	2.	253
	3.	257
	4.	261
	5.	278
	6.	308

Nema porasta tvrdoće u području pukotine što upućuje na nepromijenjenu mikrostrukturu.

4.4.2 Mjerenje mikrotvrdoće na uzorku 2



Slika 43. Raspored mjerenja mikrotvrdoće na uzorku 2

Tablica 9. Vrijednost mikrotvrdoće u području pukotine uzorka 2

Mjerenje		HV0,2
Pukotina	1.	278
	2.	308
	3.	241
	4.	265
	5.	319
	6.	265

Nema porasta tvrdoće u području pukotine što upućuje na nepromijenjenu mikrostrukturu.

5. Zaključak

Dobiveni uzorak prvotno je vizualno pregledan, vidljiva je plastična deformacija cijevi.

Uočena je kapljica u području zavora najvjerojatnije nastala tijekom zavarivanja.

Endoskopskim ispitivanjem uočena je promijenjena unutrašnja strana cijevi u području zavora kao posljedica postupka zavarivanja.

Radiogramom nisu uočene greške u obliku poroziteta ili uključina.

Uzorak je izrezan u području zavora, na mjestu početka i završetka pukotine u cilju analize mikrostrukture karakterističnih područja.

Mikrostruktura osnovnog materijala je feritno-perlitna očekivana za 25CrMo4 čelik bez vidljivih grešaka koje bi mogle utjecati na mehanička svojstva materijala. U ZUT vidljivo je povećanje zrna koje se javlja promjenom strukture materijala uslijed visokih temperatura zavarivanja.

Povećano zrno u ZUT karakteristično je za krhku martenzitnu strukturu koja je mogla utjecati na pojavu pukotine u uzorku.

Svjetlosnim mikroskopom uočene su greške na liniji staljivanja u obliku poroziteta i uključina koje negativno utječu na mehanička svojstva zavora.

Osim glavne pukotine koja se analizira uočena je manja pukotina na liniji staljivanja.

U području pukotine došlo je do plastične deformacije osnovnog materijala koja je prethodila pojavu loma. Mjerenjem mikrotvrdoće vidljiv je porast tvrdoće u području ZUT-a.

Vrijednosti tvrdoće do 600 HV potvrđuje postojanje tvrde martenzitne faze. Vrijednosti tvrdoće u materijalu zavora i oko pukotine su karakteristične za osnovni materijal.

LITERATURA

- [1.] R. K. Rajput: A textbook of automobile engineering, Firewall Media, 2007
- [2.] https://carsexplained.wordpress.com/2016/06/12/_trashed/(S)
- [3.] Genta G, Morello, L, Cavallino F: The Motor Car Past, Present and Future, Springer 2014
- [4.] http://www.nissan-sd.com/models/pickup4wd/performance/v_pe_fr_2_3.htm
- [5.] <https://www.quora.com/What-is-the-difference-between-a-unibody-monocoque-and-space-frame-in-cars>(S)
- [6.] Matt Gartner: Chassis Engineering: Chassis desing, Paperbeck 1992
- [7.] https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/7/70/Lamborghini_Aventador_LP_700-4_chassis_-_Flickr_-_J.Smith831.jpg
- [8.] <http://ispatguru.com/steels-for-automotive-applications/>, preuzeto 26. siječnja 2018
- [9.] https://www.fsb.unizg.hr/usb_frontend/files/13696571970materijaliikompoziti2013.pdf preuzeto 28. siječnja 2018
- [10.] <http://www.automotiveaddicts.com/34765/inside-koenigsegg-talks-about-carbon-fiber-video>
- [11.] <http://www.enciklopedija.hr/Natuknica.aspx?ID=62994>, preuzeto 28. siječnja 2018
- [12.] <https://www.saarstahl.com/sag/downloads/download/11836>, preuzeto 30. siječnja 2018
- [13.] <http://www.oerlikonline.hu/files/268.pdf>, preuzeto 1. veljače 2018
- [14.] Horvat M, Kondić V, Brezovečki D: Teorijske i praktične osnove TIG postupka zavarivanja, Stručni članak
- [15.] Ivan Samardić: Kontrola kvalitete zavarenih spojeva, metode ispitivanja bez razaranja www.sfsb.unios.hr/kth/zavar/tii/kbr_met.html, preuzeto 2. veljače 2018
- [16.] <https://www.olympus-ims.com/en/rvi-products/iplux-ultralite/>
- [17.] Nondestructive Testing Handbook, Second Edition, Volume Three Radiography & Radiation Testing; American Society for Nondestructive Testing, USA 1985.
- [18.] <https://glossary.periodni.com/glosar.php?hr=spektar+elektromagnetskog+zra%C4%8Denja>
- [19.] Industrial Radiography - Image forming techniques, GE Company, 2007.
- [20.] Schauerl Z.: Autorizirana predavanja: Karakterizacija materijala, Sveučilište u Zagrebu, FSB, 2015.
- [21.] <http://e-skola.biol.pmf.unizg.hr/odgovori132.htm>, preuzeto 2. veljače 2018
- [22.] Državni zavod za mjeriteljstvo: Metalni materijali, Ispitivanje tvrdoće prema Vickersu, Ispitna metoda, Narodne novine, Zagreb, 1999

PRILOZI

I. CD-R disc